

Estudio de Sensibilidad de Diferentes Factores que Influyen en la Realización de Análisis Modales Experimentales

X. Remírez Perea, J. M. Pintor Borobia

*Universidad Pública de Navarra, Dpto. Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, Campus Arrosadía s/n, 31006 Pamplona (España);
Tlfno:948169631; Fax: 948169099; remirez.31528@e.unavarra.es*

Resumen

En el presente trabajo se analiza el efecto que en los resultados de un Análisis Modal Experimental (AME) tienen algunos de los factores que intervienen en su ejecución. Para ello, se diseña una metodología de ensayos experimentales sobre un componente de geometría sencilla que permite su estudio detallado. El componente elegido es una placa rectangular de acero de dimensiones 350 x 210 x 4 mm, con un peso aproximado de 2.3 Kg. El diseño de los experimentos permite estudiar la influencia de factores tales como el punto de excitación, la colocación y distribución de sensores sobre el componente, el tipo de excitación empleado, etc. Su influencia se analiza tanto sobre las Funciones de Respuesta en Frecuencia (FRFs) como, posteriormente, sobre los parámetros modales obtenidos (frecuencias y modos de vibración).

Palabras Clave: Análisis Modal Experimental, vibración, sensibilidad.

Abstract

This article describes the effect that the variation of some factors has on the results of an Experimental Modal Analysis (EMA). A rectangular steel plate is used as a workbench to analyse the variation of the Frequency Response Functions and the modal parameters obtained from the experimental tests. Variables as the excitation point, the excitation type or the sensor locations are examined. Several advises about the test configuration are obtained.

Keywords: Experimental Modal Analysis, vibration, sensitivity.

1. Introducción y desarrollo experimental

En este artículo, se recoge un estudio de sensibilidad de diferentes factores que influyen en los resultados de la ejecución de análisis modales experimentales (AMEs). La importancia de estos análisis viene justificada por la necesidad de determinar adecuadamente el comportamiento dinámico de sistemas mecánicos mediante sus parámetros modales.

El estudio es parte del trabajo realizado en el Grupo de Investigación de Ingeniería Mecánica Aplicada y Computacional (IMAC) de la Universidad Pública de Navarra

dentro del ámbito del análisis modal y del estudio de las vibraciones en sistemas mecánicos.

Su objetivo es el análisis detallado de diversos factores que influyen en la realización de AMEs, centrando el esfuerzo en la obtención de recomendaciones a tener en cuenta en algunos aspectos concretos de estos ensayos, como por ejemplo la selección de los puntos de excitación o de respuesta, el tipo de excitación y la forma de introducirla.

Para su realización se empleó un sistema de adquisición multicanal LMS Scadas III y el software de análisis modal LMS Test.Lab, rev. 4B; además, claro está, de la instrumentación habitual en este tipo de ensayos modales: martillo instrumentado, excitador electrodinámico, células de carga y acelerómetros piezoeléctricos, ...

2. Desarrollo experimental

La estructura elegida como banco de pruebas para los ensayos fue una placa rectangular de acero, de dimensiones 350 x 210 x 4 mm y con un peso aproximado de 2.3 Kg. Sobre ella, se seleccionaron 17 puntos de medida homogéneamente distribuidos (Figura 1) en los que se fueron colocando los transductores correspondientes durante los diferentes ensayos.

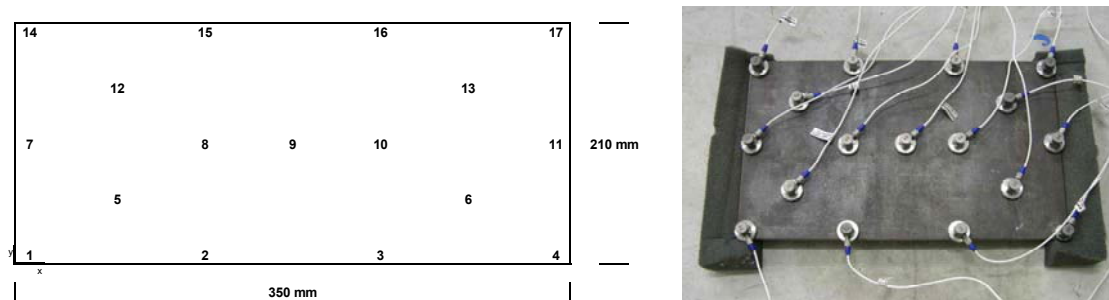


Figura 1. Conjunto de puntos de medida sobre la placa

Las condiciones de contorno de la placa se establecieron mediante apoyos de foam (Figura 1) con el objetivo de aproximar suficientemente bien la hipótesis ideal de contorno libre-libre. Para comprobar el nivel de aproximación a esa hipótesis de contorno, se desarrolló un modelo virtual por Elementos Finitos de la placa en el que se analizaron distintos valores de rigidez vertical en la zona de los apoyos para tratar simular la posible existencia de los cojines de espuma o de otros tipos de apoyos. El

análisis modal teórico realizado con ANSYS arrojó los resultados que pueden apreciarse en la Figura 2 para diferentes valores de rigidez considerados.

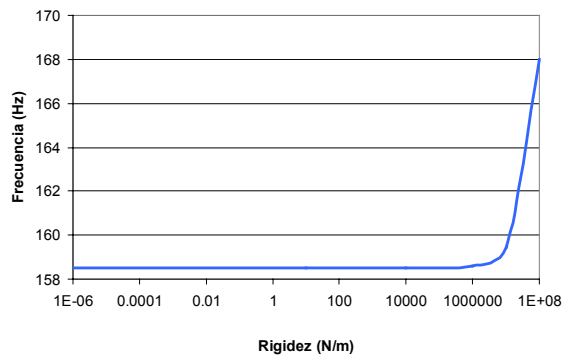


Figura 2. Variación de la primera frecuencia natural en función de la rigidez de los apoyos

En esta gráfica, se observa como para valores de la rigidez de hasta 1000 KN/m apenas se veía influida la frecuencia del primer modo natural a flexión de la placa. Dado que es fácil estimar que la rigidez de la espuma es varios órdenes de magnitud menor, se pudo dar por válida la aproximación de la hipótesis de contorno libre-libre.

Por otro lado, por lo que se refiere propiamente a la realización de los diferentes ensayos modales, hay que hacer constar que fueron empleadas dos técnicas de excitación para llevar a cabo los mismos: excitación por impacto (haciendo uso de un martillo sensorizado con una célula de carga piezoeléctrica) y excitación aleatoria (empleando un excitador electrodinámico acompañado, igualmente, de una célula de carga piezoeléctrica).

2.1. Ensayos con excitación por impacto

En los ensayos con excitación por impacto, el primero de los parámetros de ensayo analizado fue la selección del punto de excitación. Para ello, se realizaron varios ensayos en los que la única diferencia estribaba en el lugar elegido de la placa para realizar la excitación. Impactando con un martillo sensorizado (dado la rapidez y sencillez del método) se compararon las Funciones de Respuesta en Frecuencia (FRFs) obtenidas en cada uno de los casos. También fueron estudiados, tanto el número de promedios empleado, como el método de fijación de los acelerómetros. La distribución de los sensores por la geometría de la placa, así como la observación de las

consecuencias de la división de cada ensayo en varias fases con subconjuntos distintos de puntos de medida arrojó también resultados interesantes.

2.2. Ensayos con excitación aleatoria

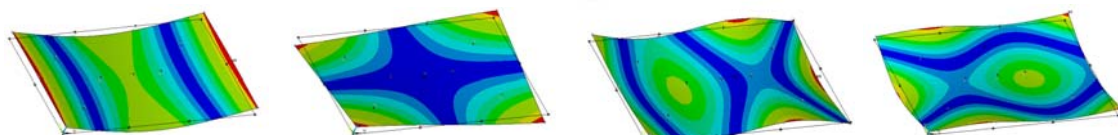
En los ensayos con excitación aleatoria, fueron analizados aspectos tales como el promediado, el empleo de distintas ventanas de ponderación y el uso de diferentes funciones de excitación (Random y Burst Random). Además, se pudo realizar una comparación en términos de precisión de resultados, alcance en frecuencia y rapidez y facilidad de montaje, entre los dos sistemas de excitación y entre varios métodos de unión del sistema de excitación a la estructura a ensayar.

3. Resultados

3.1. Excitación por impacto

De este primer conjunto de ensayos realizados, se obtuvieron las conclusiones más interesantes al afrontar el problema de la elección del punto de excitación. En este aspecto, no sólo se habrá de impactar en un lugar tal que se garantice la correcta excitación del conjunto de modos de interés, sino que, además, se habrá de tener en cuenta la posibilidad de existencia de modos dobles o muy cercanos [1].

Para garantizar la correcta extracción de los parámetros modales correspondientes a estas parejas de modos, será necesario en muchos casos recurrir a ensayos de múltiple excitación (Multiple Input Multiple Output, MIMO) [2]. Los componentes de geometrías con varios ejes de simetría son especialmente propensos a esta situación, como es el caso de este estudio, donde la placa tiene cuatro modos problemáticos agrupados en dos parejas de modos de frecuencias muy cercanas en 159 y 433 Hz, respectivamente (ver Figura 3).



Modo 1 (158.54 Hz)

Modo 2 (159.26 Hz)

Modo 4 (432.87 Hz)

Modo 5 (433.41 Hz)

Figura 3. Parejas de modos cercanos

El disponer de un primer modelo virtual de elementos finitos de la estructura bajo estudio, que nos ofrezca una primera aproximación de las frecuencias de resonancia y, sobretodo, de las formas de los modos esperados, constituirá una ayuda importante en esta tarea de seleccionar el punto de excitación más adecuado. Así, podremos evitar excitar en nodos, o puntos cercanos a ellos, de los modos de interés. Se intentará huir de ejes o planos de simetría, siendo especialmente recomendados los extremos libres puesto que habitualmente participan en un gran número de modos.

En cuanto al método de fijación de los acelerómetros, aunque otros métodos (como la cera de abeja o el atornillar los transductores a la estructura bajo estudio) ofrecen mejores resultados, la unión se realizó mediante bases magnéticas (17g cada una, frente a 8 g de cada acelerómetro). Pese a que su elevada masa puede suponer a priori un inconveniente, al ser el estudio de esta influencia uno de los objetivos del trabajo, esta circunstancia pudo ser aprovechada [3]. Así, se pudo comprobar como la división de cada ensayo en varias partes, al emplear un número de acelerómetros inferior al número de puntos de medida, suponía un ligero desplazamiento de las frecuencias naturales. Este hecho causaba la aparición de picos duplicados que complicaban el ajuste de las FRFs (Figura 4) para la extracción de los parámetros modales [4].

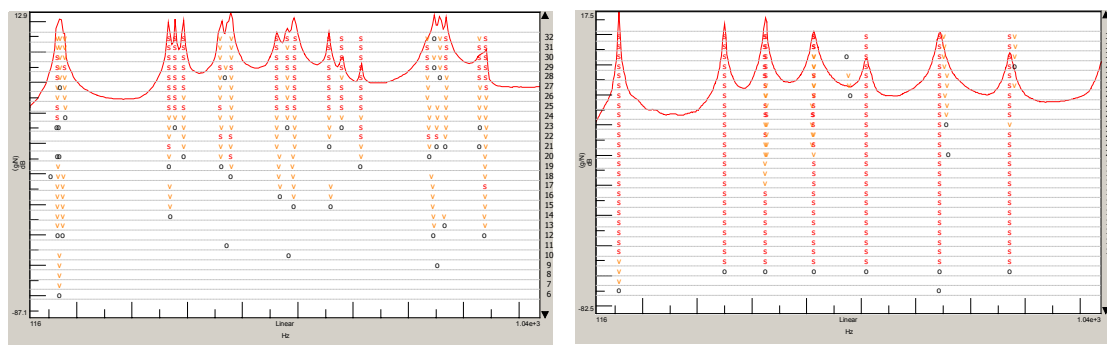
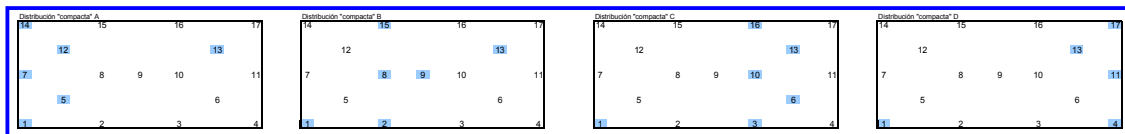


Figura 4. Diagramas de estabilización y FRFs para ensayos sobre la placa desarrollados en 4 grupos de impactos y en un solo grupo de impactos

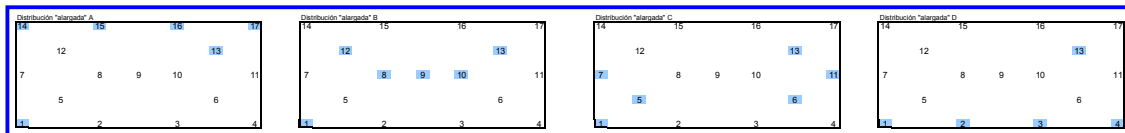
Una manera sencilla de comprobar si el efecto de la masa de los sensores es apreciable, consiste en colocar un acelerómetro en un punto, realizar el ensayo, y volverlo a realizar a continuación pero empleando dos sensores en ese mismo punto. Si el desplazamiento frecuencial es apreciable, la masa de los sensores que coloquemos afectará de manera significativa a nuestros resultados [5]. En estos casos, la colocación más o menos uniforme de las masas añadidas contribuirá a obtener unos resultados más coherentes.

La distribución de los sensores es por tanto un aspecto destacado a tener en cuenta. Se realizaron varios ensayos con el objetivo de comprobar las consecuencias que esta distribución podía tener en los resultados. En ellos, se emplearon primero 6 acelerómetros para completar los 17 puntos de medida en cuatro tandas de cuatro maneras diferentes, repitiendo siempre dos puntos para poder establecer comparaciones. Posteriormente se completaron los ensayos en dos y un solo grupo de impactos, tal como se ve en la Figura 5.

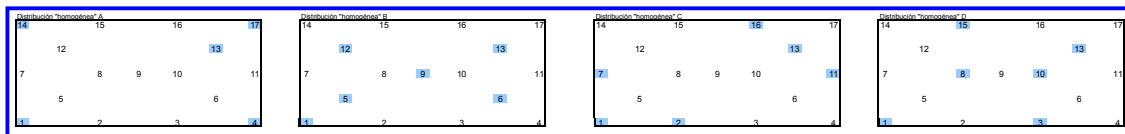
Distribución “compacta”



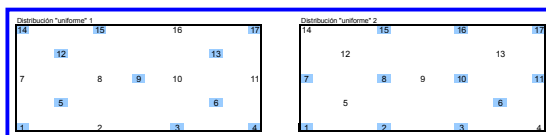
Distribución “alargada”



Distribución “homogénea”



Distribución “uniforme”



Distribución “única”

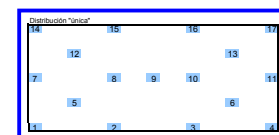


Figura 5. Configuraciones de medición empleadas

A pesar de emplear un mismo número de sensores, diferentes distribuciones de éstos por la placa provocaron efectos distintos, tanto menos perjudiciales cuanto más homogéneo fue el reparto de masas que suponía su presencia. Sin embargo, la influencia más apreciable viene causada por el número de partes en las que se realiza el ensayo. Cuantos menos grupos de impactos necesitemos para completar el conjunto de puntos de medida, mayor será la precisión en la FRF suma sobre la que realizaremos el ajuste y menor el número de picos duplicados.

3.2.3 Excitación aleatoria

Las funciones de excitación empleadas fueron Random y Burst Random (Figura 6), a las cuales se les aplicaron las ventanas de ponderación Hanning y Uniforme, respectivamente [6]. El empleo de otras posibles combinaciones ofreció siempre peores resultados.

Al comparar los resultados ofrecidos por los ensayos Random y Burst Random, se observó como las FRFs son, en términos generales, muy similares, si bien la función Burst Random ofrece mayor precisión y definición en los picos. La excitación Random, debido al efecto del leakage, presenta picos distorsionados y medidas de menor calidad que las realizadas mediante Burst Random. Observando con un mayor detalle (Figura 6) un rango de frecuencias en el entorno de la primera resonancia (alrededor de 160 Hz), podemos comprobar esta afirmación [7,8].

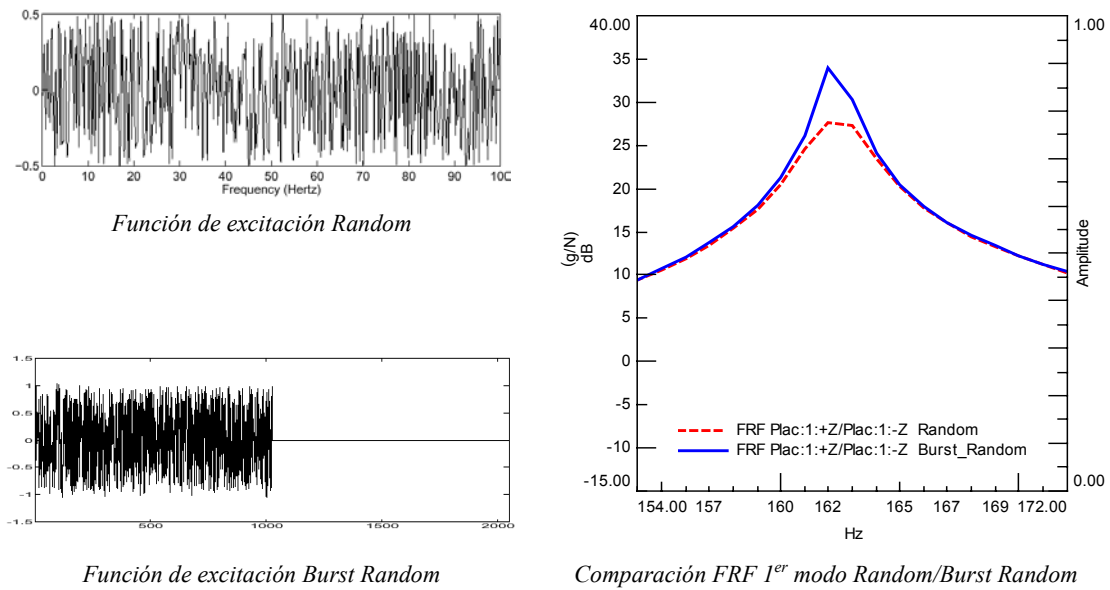


Figura 6. Comparación primera resonancia 160Hz

Por último, también se analizó la influencia del uso de diferentes métodos de unión del sistema de excitación al espécimen ensayado. Si el componente lo permite, los mejores resultados se obtuvieron atornillando el excitador al driving point. Como esta opción no siempre será factible, se compararon los resultados ofrecidos por dos métodos que no precisan de la modificación del elemento: el pegado con cianocrilato y el empleo de imanes. Como cabría esperar, los resultados son sensiblemente mejores en el caso del pegado (Figura 7). Para niveles de excitación no muy elevados el imán ofrece una

alternativa poco precisa pero de fácil montaje y desmontaje; mientras que si se aumenta la energía introducida, los imanes no resultan en absoluto recomendables.

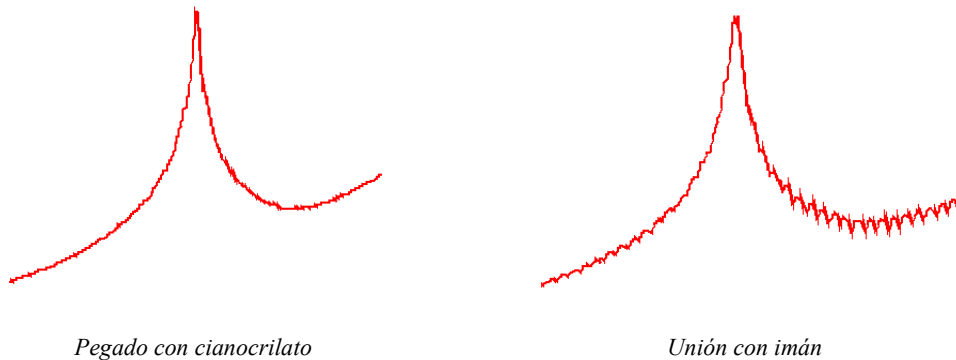


Figura 7. Comparación FRFs según el método de unión del sensor (pegado e imán)

4. Conclusiones

La elaboración de este trabajo ha supuesto la realización de más de 20 análisis modales experimentales completos, abarcando las principales posibilidades que dispone el investigador al afrontar un análisis de este tipo. El amplio conjunto de ensayos realizado ha permitido realizar una valoración de la influencia que la variación de diferentes factores tiene en los resultados de un AME. Además, se ha realizado un estudio más detallado de algunos de ellos, realizando las recomendaciones oportunas mencionadas anteriormente para afrontar con éxito los análisis de este tipo en lo referente a: selección del punto de excitación más adecuado (evitar nodos y ejes de simetría, considerar los extremos libres, estudio del modelo de EF), distribución de los sensores (emplear el menor número de grupos de impactos, distribuir homogéneamente los sensores por el componente), elección de la función de excitación en el caso de emplear un excitador electrodinámico (la función burst random ofrece en general resultados más precisos que la random y no requiere ventanas), método de fijación del sistema de excitación, ...

5. Referencias

1. P.Avitabile, M.Richardson y B.Schwarz, *Locating Optimal References for Modal Testing*, 20th IMAC, Los Ángeles (2002).
2. X. Remírez, J.M. Pintor. *Establecimiento y Optimización de una Metodología para la Realización de Análisis Modales Experimentales Mediante la Aplicación de Técnicas MIMO*, XVI CNIM, León (2004).

3. D.J. Ewins, *Modal Testing; Theory, Practice and Application*, Research Studies Press Ltd, Hertfordshire, (2000).
4. P. Avitabile, *SEM Experimental Techniques*, Vol. 24 (Nº6) (2000), págs 19,20.
5. P. Avitabile, *SEM Experimental Techniques*, Vol. 26 (Nº1) (2002), págs 13,14.
6. *The Fundamentals of Signal Analysis*, Application Note 243, Agilent Technologies, (2000).
7. *Shaker Excitation for Experimental Modal Analysis*, Shaker Excitation Tutorial, Structural Dynamics Research Laboratory, University of Cincinnati (2001).
8. P. Avitabile, *SEM Experimental Techniques*, Vol. 23 (Nº1) (1998), págs 13,14.